

三阶对角累量在故障诊断中的应用

吴文兵^{1,2}, 黄宜坚³

(1. 福州外语外贸学院, 福建 福州 350018; 2. 厦门大学信息科技学院, 福建 厦门 361000;
3. 华侨大学机电工程学院, 福建 泉州 362021)

摘 要: 三阶累量能有效去除高斯噪声, 而且其对角累量能有效保持信号特征, 由其产生的 $1\frac{1}{2}$ 维谱可以显示信号的二次相位耦合信息。实验中通过计算故障信号和正常信号的三阶对角累量信息, 然后利用这些信息进行具体的故障判别。实验结果取得了令人满意的效果。

关键词: 三阶对角累量; $1\frac{1}{2}$ 维谱; 故障诊断

中图分类号: TG156 文献标识码: A 文章编号: 1001-196X (2012) 03-0129-04

Application of three-order diagonal cumulants in fault diagnosis

WU Wen-bing^{1,2}, HUANG Yi-jian³

(1. Fuzhou Technical College of Foreign Studies and Trade, Fuzhou 3500187, China;
2. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Three-order cumulant can eliminate the Gaussian background noise and keep signals features effectively. The $1(1/2)$ dimensional spectrum originated from it can display the signal of quadratic phase coupling information. The vibration signals of relief valve in normal and anormal situations were collected in the experiment. Three-order diagonal cumulants of collected signals were calculated out, the feature vector was extracted, and then the fault diagnosis was conducted with least squares vector machine. The experiment indicates that the validity is above 80% and the method is feasible.

Key words: three-order diagonal cumulant; $1(1/2)$ dimensional spectrum; fault diagnosis

0 引言

由于高斯过程的高阶累积量 (当阶次大于 2 时) 等于零, 而对于非高斯过程, 至少存在着某个大于 2 的阶次 k , 其 k 阶累积量不等于零。因此, 利用高阶累积量可以自动抑制高斯背景噪声 (有色或白色) 的影响, 建立高斯噪声下的非高斯信号模型, 提取高斯噪声中的非高斯信号 (包括谐波信号)。正因为这样, 高阶累积量这

一统计量已日益受到人们的重视并已成为信号处理中一种非常有用的工具^[1-3]。由三阶对角累量得出的 $1(1/2)$ 维谱包含了信号的非线性相位耦合, 尤其是二次相位耦合^[4-5], 本文通过计算正常信号和故障信号的三阶对角累量, 并以此为基础进行故障诊断的研究。

1 高阶累积量

设 $\{x(n)\}$ 为零均值 k 阶平稳随机过程, 则该过程的 k 阶累积量 $c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 定义为随机变量 $\{x(n), x(n+\tau_1), \dots, x(n+\tau_{k-1})\}$ 的 k 阶联合累积量, 即

$$c_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}\{x(n), x(n+\tau_1), x(n+\tau_2), \dots, x(n+\tau_{k-1})\} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-12-16; 修订日期: 2012-01-12

基金项目: 国家自然科学基金 (50975098); 福建省教育厅 A 类科技项目 (JA11342)

作者简介: 吴文兵 (1968-), 男, 福州外语外贸学院讲师。

该过程的 k 阶矩 $m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$ 则定义为随机变量 $\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\}$ 的 k 阶联合矩, 即

$$m_{kx}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{mom}\{x(n), x(n + \tau_1), \dots, x(n + \tau_{k-1})\} \quad (2)$$

三阶累积量为

$$c_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E\{x(n)x(n + \tau_1)x(n + \tau_2)\} \quad (3)$$

令 $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, 得到三阶累积量的一维对角切片

$$c_{3x}(\tau, \tau) = E\{x(n)x(n + \tau)x(n + \tau)\} \quad (4)$$

再对该切片作傅里叶变换, 得到 $\frac{1}{2}$ 维谱

$$B(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau, \tau) e^{-j\omega\tau} \quad (5)$$

2 数据采集

当溢流阀进出油口有异物, 压力偏高或偏低都会影响到溢流阀的正常运行, 为了获取溢流阀在故障状态下的运行信号, 本文进行的实验人为在溢流阀进油口加 $\phi 3$ mm 的铁芯以制造故障效果。通过实验可以近似模拟溢流阀工作故障状况。

本文利用 LabVIEW 软件及 PCI-6014 的数据采集卡和一个加速度传感器, 依次采集溢流阀在正常和故障状态下的振动信号。在每种测量中, 将油路压力从 1 ~ 5 MPa 分五个压力等级。采样频率 250 Hz, 读取频率 125 Hz, 采样过程时间约 2 min。本次实验分别在溢流阀正常工作状态和故障状态各自采集了 18 组共 36 组数据。本文实验使用的数据个数为 1024 个。

由于测试过程中系统外部和内部各种因素的影响必然在输出过程中夹杂着不需要的成分, 本文采用中值法对采集的振动信号进行预处理剔除混杂在信号中的干扰噪声。滤波后的信号如图 1 所示。

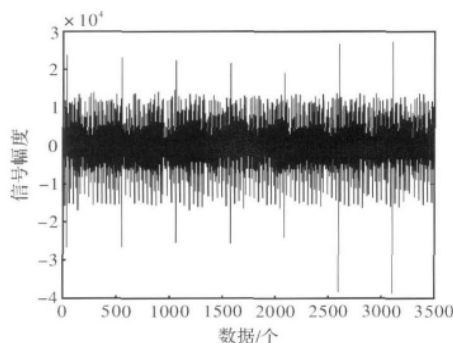


图1 滤波后的信号

Fig. 1 Signal after filtering

3 特征提取

首先按照文献 6 的方法计算出正常信号和故障信号的三阶对角累量, 累积量的延迟范围为 $[-64, 64]$, 取每组数据延迟范围为 $[-12, 12]$ 的对角累量值作为特征向量, 输入支持向量机进行故障识别。

4 最小二乘支持向量机原理

最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 方法采用最小二乘线性系统作为损失函数, 寻优目标函数为

$$\Psi_{LS}(w) = \frac{1}{2}(w \cdot w) + \frac{1}{2}\gamma \sum_{i=1}^n e_i^2$$

其约束条件为

$$y_i[w \cdot \phi(x_i) + b] - 1 + e_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, γ 为惩罚因子; e_i 为每一个样本点给定的误差量, 定义如下 Lagrange 函数

$$L(w, b, e_i, \alpha_i) = \frac{1}{2}(w \cdot w) + \frac{1}{2}\gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{y_i[w \cdot \phi(x_i) + b] - 1 + e_i\}$$

式中, $\alpha_i \in R$ 为 Lagrange 乘子。为求 Lagrange 函数的最小值, 将其对 w, b, e_i, α 分别求偏导, 并令其等于 0, 得矩阵方程

$$\begin{bmatrix} 0 & -Y^T \\ Y & ZZ^T + \gamma^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_v \end{bmatrix}$$

式中, $Z = [\phi(x_1)^T y_1; \phi(x_2)^T y_2, \dots, \phi(x_n)^T y_n]$, $Y = [y_1; y_2; \dots; y_n]$, $e = [e_1; e_2; \dots; e_n]$, $\alpha = [\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_n]$, $l_v = [1; 1; \dots; 1]$ 。若选取核函数 $K(x_i, x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j)$, ($i, j = 1, 2, \dots, n$), 最终得到的 LS-SVM 最优分类决策函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right]$$

式中, α_i, b 是线性方程组 (1) 的解。

由于径向基核函数学习能力较强, 本文选用该函数对溢流阀故障进行识别, 该函数表达式为

$$K(x_i, x) = \exp\left\{-\frac{|x_i - x|^2}{2\sigma^2}\right\}$$

5 实验结果

本文为了有效判别故障, 利用支持向量机作为工具, 按式 (4) 求出了正常信号和故障信号的三阶对角累量, 取延迟范围为 $[-12, 12]$

的对角累量值作为特征向量，将其输入支持向量机进行故障诊断^[7]。正常信号和故障信号两种状态的三阶对角的特征向量见表 1。

表 1 三阶对角累量特征向量

Table 1 Feature vector of tree-order diagonal cumulant

正常状态	0. 8171	0. 0923	0. 0447	0. 0122	0. 0222	0. 0060	...
	0. 7012	0. 1274	0. 0622	0. 0458	0. 0307	0. 0209	...
	0. 5938	0. 1247	0. 0545	0. 1173	0. 0278	0. 0530	...
	...						
故障状态	0. 7417	0. 0839	0. 0413	0. 0656	0. 0205	0. 0294	...
	0. 6722	0. 0942	0. 0426	0. 1001	0. 0212	0. 0449	...
	0. 1796	0. 1614	0. 1179	0. 1207	0. 0920	0. 0899	...
	...						

在训练 LSSVM 时，分别将正常状态和故障状态编码为 1 和 -1，由于正常数据和故障数据分别是在 5 种不同的油压下获得的，训练时分别在表 1 的正常数据和故障数据中取出相对应的 5 组数据共 10 组，对所建立的最小二乘支持向量机进行训练，训练结束后再利用该支持向量机进行故障识别，利用训练后的网络对剩下的 26 组数据进行模拟识别，26 组数据的模拟后的状态如图 2 所示，图中空心圆圈表示训练数据预先设定的状态，如前 13 组数据是测量的正常数据，应该处于图中上横线所示的 1 状态，后 13 组故障数据应该处于下横线所表示的 -1 状态，空心三角形表示经过 LSSVM 模拟后对数据所进行的分类结果，如果某组数据的空心圆圈和三角形重合，则表示这组数据的模拟结果正确，否则

错误。模拟后的结果如图 2 所示，结果显示，在正常状态有 2 组识别错误，故障状态有 3 组一共 5 组识别错误，正确率达到 80% 以上，说明此方法是可行的。

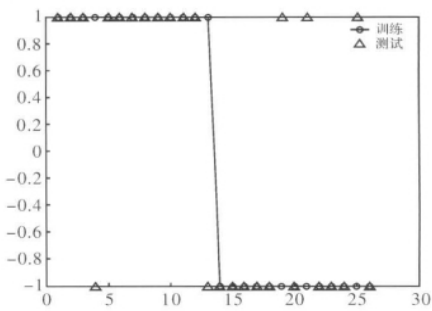


图 2 故障诊断模拟结果图

Fig. 2 Simulation result of fault diagnosis

6 维谱图 (图 3)

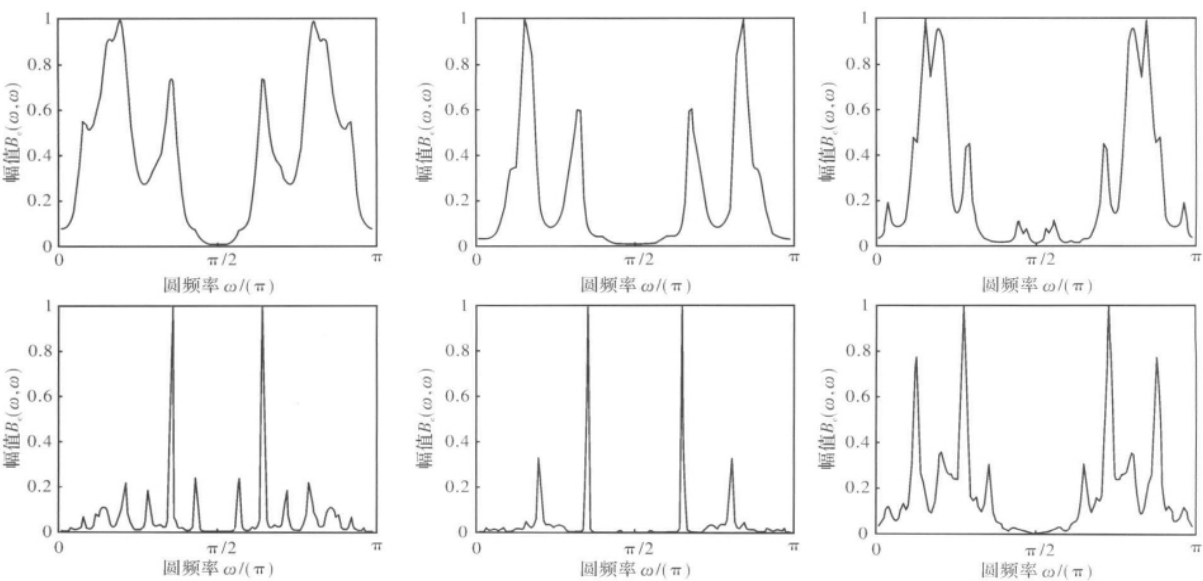


图 3 正常信号和故障信号 $1 \frac{1}{2}$ 维谱图

Fig. 3 $1 (1/2)$ demntional spectrum of normal signal and fault signal

为了直观地认识三阶对角累量能保持信号特征这一性质,本实验按式(5)求出了正常状态和故障状态每组数据的维谱。本文选取在油压分别为 1 MPa、2 MPa、5 MPa 时进行图示,如图 3 所示,图中横轴表示圆频率,纵轴表示归一化后的幅值大小,无量纲。可以看出,故障状态总体上要比正常状态的谱峰构成更复杂些,也更尖锐一些。

7 结论

尽管机械振动信号极其复杂,但每种故障的产生均有其固有特征,这种固有特征使得故障信号和正常信号之间存在着某种本质区别,本文通过三阶对角累量进行故障诊断,取得了一个令人满意的结果。

参考文献:

- [1] 蔡奇志,黄宜坚. 自回归三谱切片研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (02): 19-22.
- [2] 杨江天,徐金梧. 旋转机械故障的双相干谱特征及其识别 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (09): 103-106.
- [3] 吴正国,夏立,尹为民. 现代信号处理技术: 高阶谱、时频分析与小波变换 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 21-22.
- [4] Hinich Melvin J. Higher-order cumulants and cumulants spectra [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 1994, 13 (4): 391-420.
- [5] 张严,王树勋,李生红. 二次相位耦合的维谱分析 [J]. 电子学报, 1996, 24 (04): 109-112.
- [6] 王文莉,李友荣,吕勇. 基于 $1(1/2)$ 维谱的二次相位耦合分析 [J]. 煤矿机械, 2007, (1): 23-25.
- [7] 吴文兵,黄宜坚. 基于双相干谱的溢流阀故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2011 (10).